

## **Análise Estrutural Estática do Chassi de uma Transplantadora com base no emprego do Software Solidworks Simulation**

Ana Paula Ost (FAHOR) [ao000987@fahor.com.br](mailto:ao000987@fahor.com.br)

Claudia Vanessa Kraulich (FAHOR) [ck000979@fahor.com.br](mailto:ck000979@fahor.com.br)

Guilherme Ribas (FAHOR) [gr000950@fahor.com.br](mailto:gr000950@fahor.com.br)

César Mantovani (FAHOR) [mantovanicesara@fahor.com.br](mailto:mantovanicesara@fahor.com.br)

### **Resumo**

*Em um estudo de comportamento de sistemas físicos são utilizados modelos físicos (usualmente em escala reduzida, de laboratório) e/ou modelos matemáticos. O avanço da ciência e o cotejamento entre esses modelos têm motivado um grande desenvolvimento dos modelos matemáticos, os quais propiciam modelagens realísticas, confiáveis e de aplicações práticas na engenharia, sendo muito mais econômicos do que os modelos físicos. Seguindo este pensamento, esta obra apresenta um dos métodos de modelo matemático e numérico mais utilizado atualmente, o Método dos Elementos Finitos (FEA), respaldado pelo emprego de um programa comercial, largamente utilizado por profissionais da área de engenharia, SolidWorks Simulation. São desenvolvidas análises do tipo estática em um chassi de uma transplantadora de mudas de hortaliças, considerando-se estratégias de modelagens distintas, associadas ao emprego de diferentes tipos de materiais previamente definidos: aço 1020, aço 1045, liga de alumínio 1060 e aço ASTM A36. Objetivando, inicialmente, prever o comportamento da estrutura frente a alguns cenários e também analisar qual seria dentre os materiais empregados, aquele que melhor adequa-se as necessidades do projeto.*

*Palavras chave: Chassi, Transplantadora de mudas, Método dos Elementos Finitos*

### **1. Introdução**

Atualmente, o computador se tornou uma ferramenta absolutamente obrigatória para o desenvolvimento de projetos associados às engenharias (Silva et al, 2011). Existem inúmeros softwares comerciais no mercado, entre os quais se destacam: ANSYS, SOLIDWORKS e COSMOS com tal finalidade. O uso de tais ferramentas justifica-se pela possibilidade de analisar e calcular numericamente modelos complexos, referentes a estruturas reais, com maior precisão e rapidez.

Quando há a necessidade de estudar ou projetar uma estrutura, é normal realizar-se um conjunto de análises e modificações das suas características, com o objetivo de atingir uma solução satisfatória, quer em termos econômicos, quer em termos da verificação de condições funcionais.

Segundo Beltrão (2009), com o grande desenvolvimento que o Método de Elementos Finitos (método empregado nos softwares citados acima) apresentou na década de 60 e com a generalização dos meios de cálculo automático, assiste-se à utilização cada vez mais frequente deste método e passou a ser prática comum a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento.

A finalidade da aplicação do programa SolidWorks Simulation no chassi da transplantadora de mudas é calcular a resposta da estrutura às solicitações a que mais frequentemente estará sujeita. Mais especificamente, pretendeu-se determinar os valores dos deslocamentos e das tensões suportadas pela referido chassi. Para efetuar estas análises, foram consideradas forças e momentos em locais específicos, de modo a simular situações reais e ser possível identificar as regiões mais solicitadas da estrutura e o melhor material a compô-la.

## 2. Revisão da Literatura

### 2.1 Generalidades sobre o Método dos Elementos Finitos (FEA)

Método dos Elementos Finitos, FEA, é utilizado frequentemente para a resolução de problemas da mecânica do contínuo, obtendo uma ótima precisão na solução de problemas de engenharia. O emprego do FEA não é restrito apenas a problemas estruturais sendo utilizado, também, na solução para problemas de transferência de calor, mecânica dos fluidos, eletromagnetismo, etc.

O FEA consiste em uma aproximação numérica para a resolução de equações diferenciais por integração. Tal método é aplicado, inicialmente a partir da divisão de um sistema ou conjunto, a ser analisado, em partes discretas menores (discretização do modelo). Na sequência, as equações diferenciais inerentes ao tipo de análise desenvolvida, correspondentes a cada parte discretizada do sistema, conhecido usualmente como elemento finito, são resolvidas, a partir de rotinas numéricas. Dessa forma, segundo Silva et al (2011), tem-se a origem do nome deste método numérico.

Segundo o mesmo autor, o princípio básico do método é respaldado pela partição do domínio em elementos sobre os quais as variáveis do problema são aproximadas por combinações lineares de funções de interpolação, ponderadas por parâmetros a determinar. Obtidas tais funções, o comportamento de cada elemento é determinado em termos de uma relação entre valores nodais das variáveis, aproximadas pelas funções de interpolação, e os parâmetros a determinar, sendo que estes representam as incógnitas do problema.

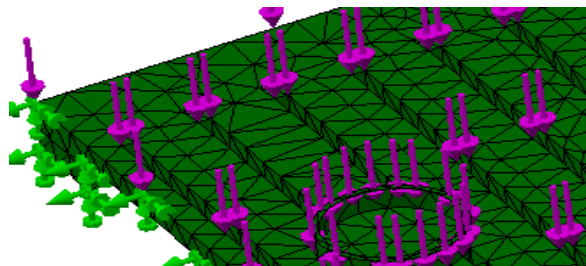


Figura 1 – Divisão da estrutura em regiões menores (Malha). Fonte: Grupo de Projeto 2011.

De acordo com Beltrão (2009) a idéia de se dividir o domínio em estudo em diversas regiões menores, conforme figura 1 soluciona um problema referente à dificuldade de se escolher funções de interpolação que descrevam o comportamento das variáveis do problema ao longo de todo o domínio, as quais devem satisfazer as condições de contorno do problema, como também representar satisfatoriamente a geometria e o comportamento do material. Fogal (2002) complementa a ideia de Beltrão, ressaltando que o método de elementos finitos está baseado na idéia de construir um objeto complexo de maneira simplificada através da utilização de blocos, ou divisão deste objeto em pequenos pedaços de fácil manuseio.

## 2.2 SolidWorks Simulation

O SolidWorks Simulation é uma ferramenta de simulação virtual totalmente integrada ao SolidWorks CAD. Apresenta recursos adicionais incluindo um conjunto poderoso de ferramentas para simulação de respostas não-lineares e dinâmicas, além do emprego de materiais compostos (VIRTUALCAE, 2011).

Alguns tipos de análises possíveis são:

- Simulação de montagens: estudo das interações entre os componentes ainda na fase de protótipo virtual, proporcionando a redução do número de protótipos físicos, através de análises de resposta de tensão, deformação e deslocamento.
- Simulação de mecanismos: simulação do movimento em mecanismos de motores, atuadores, redutores, entre outros; possibilidade de exportar os esforços provenientes do funcionamento para o SolidWorks Simulation de forma a utilizá-los como entrada de dados para a obtenção de tensões e deformações relativos aos carregamentos dinâmicos.
- Simulação de estruturas soldadas: validação de estruturas soldadas sob cargas de pressão, forças e carregamentos de mancais, visualização de resultados nas seções, ISO clipping e animações.
- Previsão de falhas: permite analisar se o produto terá problemas mecânicos referentes a tensões acima do escoamento, problemas de fadiga e flambagem.
- Otimização paramétrica: avaliação dos melhores parâmetros de projeto para a minimização de peso e tensão dos componentes.
- Frequências naturais: cálculo das frequências naturais de vibração dos componentes, de modo a evitar o surgimento de problemas de ressonâncias.
- Transferência de calor: os processos que envolvem troca térmica, como condução, convecção e radiação podem ser simulados para que a temperatura possa ser analisada em cada ponto do conjunto.
- Impacto: simulação virtual do comportamento de impacto de objetos em queda livre; permite a redução do número de protótipos físicos.
- Fadiga: cálculo da vida útil de um produto através da aplicação de esforços cíclicos; os resultados mostram regiões críticas a serem alteradas no projeto.
- Vasos de pressão: combinação de cargas estruturais e térmicas, linearização de tensão em seções, critérios da norma ASME.

### 3. Métodos e Técnicas

Para início e criação de um modelo virtual é necessário o modelamento em CAD do maior número de componentes assim como suas características geométricas, seus materiais, sua massa e seus momentos de inércia. Quanto maior a precisão neste estágio do modelamento, mais preciso será o comportamento do modelo em estudo ou simulação (PINHEIRO, 2010).

De acordo com Cook, Malkus e Plesha, as etapas a serem seguidas para a obtenção dos resultados são as seguintes:

- Formulação das propriedades de cada elemento;
- Reunião dos elementos para a obtenção de um modelo de elementos finitos da estrutura;
- Aplicação das cargas;
- Divisão da estrutura em elementos finitos com a ajuda de programas pré-processadores;
- Formulação das propriedades de cada elemento; Reunião dos elementos para a obtenção de um modelo de elementos finitos da estrutura; ) aplicação das cargas necessárias;
- Especificação de como a estrutura se comporta; Resolução simultânea das equações algébricas e lineares;
- Cálculo das tensões e do deslocamento entre os elementos e interpretação, utilizando programas pós-processadores.

Após a determinação de todas estas etapas, realiza-se a análise dos resultados. O comportamento de cada um dos elementos é descrito por funções algébricas, em que os achados representarão a distribuição das tensões e deformações do modelo.

A visualização dos resultados é feita por uma escala de cores, em que cada tonalidade, corresponde a uma quantidade de deslocamento ou tensão gerada nas estruturas.

Entretanto, apesar de todas as vantagens deste método, deve-se ter em mente que a precisão de seus resultados também possui limites de tolerância, que devem ser levados em consideração, como em todo modelo matemático.

Após os resultados encontrados foram comparados e então observado qual o melhor material a ser utilizado.

### 4. Resultados e discussões

#### 4.1 Análise Estrutural do Chassi da Transplantadora de Hortaliças

O desenvolvimento de chassi envolve alguns conhecimentos de estrutura e carregamentos, suporte e ancoragem dos pontos de fixação dos subsistemas do veículo e um valor de rigidez estimado em conhecimento adquirido em solicitações extremas provenientes de competições ou ensaios realizados (PINHEIRO, 2010).

Considerando-se todos esses aspectos, e também os modelos existentes no mercado de máquinas agrícolas, fora modelado o chassi da transplantadora, como

pode ser observado na figura 2. O referido modelo de chassi é composto por perfis e chapas do mesmo material. A modelagem da transplantadora e de todos seus componentes foi feita no software Solidworks.



Figura 2 – Esboço da Transplantadora de Mudas. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

#### 4.1.1 Análise do chassi submetido a um carregamento uniforme distribuído

Nesta primeira etapa de análise, o chassi da transplantadora se encontra submetido a cargas verticais uniformemente distribuídas sobre a superfície superior das longarinas do chassi. O carregamento sobre a estrutura corresponde à capacidade de carga útil da carroceria do veículo. O peso bruto total do conjunto transplantadora-carga é de 2000N, e esta fora a carga utilizada para a análise.

Mediante a utilização seqüencial dos processamentos de análise estrutural do programa Solidworks (VIRTUALCAE, 2011), obtém-se a discretização do chassi, via método dos elementos finitos, e a distribuição de tensões segundo o critério de Von Mises, o qual de acordo com Timoshenko e Gere (1984), é correntemente empregado para materiais que podem ser considerados dúcteis, homogêneos e isotrópicos. Sendo assim foram previstos quatro cenários de emprego de materiais: aço AISI 1020, aço AISI 1045, ASTM A36 e liga de alumínio 1060.

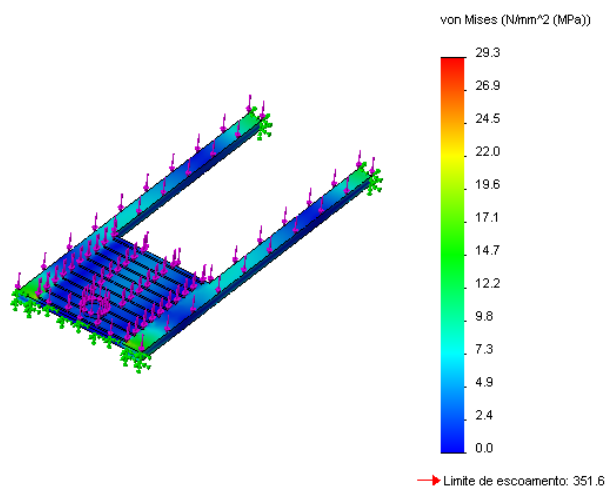


Figura 3 - Distribuição de tensões no chassi. Material Aço AISI 1020. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

A partir da distribuição de tensões segundo o critério de Von Mises, pode-se perceber, claramente na figura 3, qual a localização da região do chassi que apresenta os valores máximos de tensões, neste caso o material é aço AISI 1020, e o limite de escoamento do material não foi ultrapassado quando submetido as cargas distribuídas. Neste exemplo é bastante perceptível a possibilidade de visualização e compreensão dos conceitos físicos envolvidos, conforme Beer e Johnston (1994).

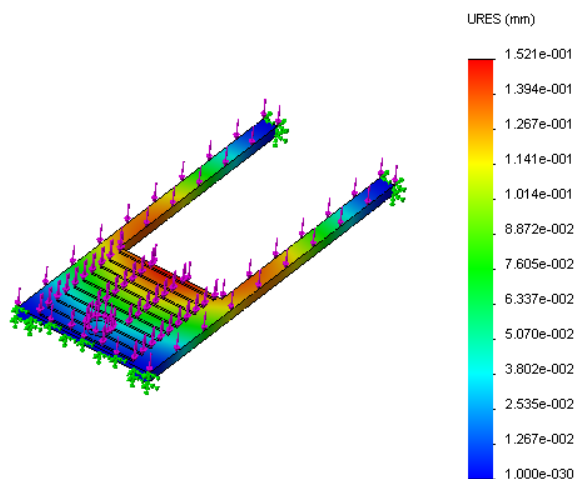


Figura 4 - Deslocamento no Chassi. Material Aço AISI 1020. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

Ainda com este método, é possível obter o deslocamento em magnitude, ou seja, o maior deslocamento de cada ponto em direção à resultante dos deslocamentos existentes, sendo independente de seu sentido, conforme figura 4.

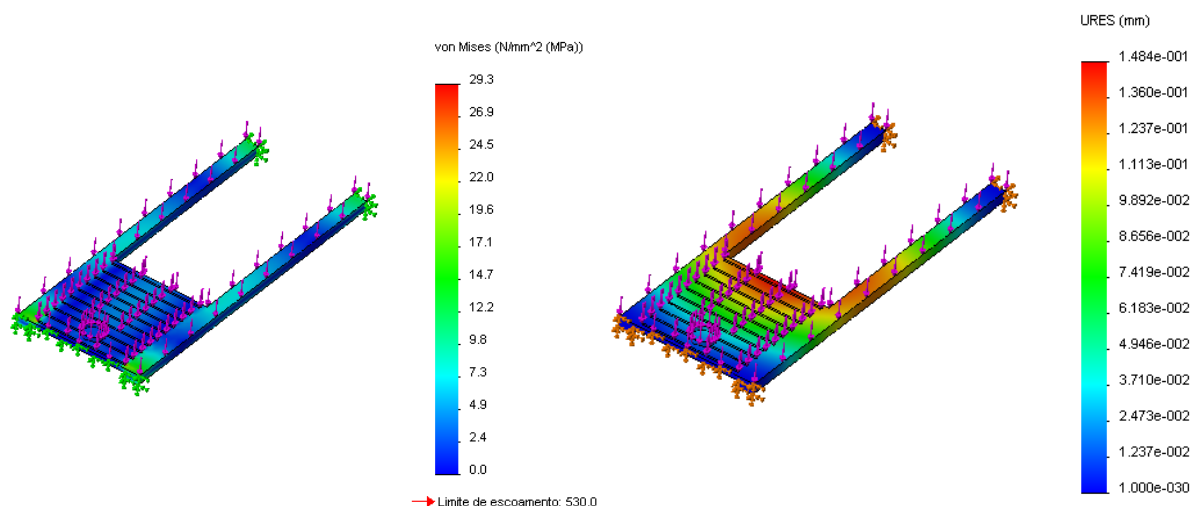


Figura 5 - Distribuição de tensões no chassi e deslocamento. Material Aço AISI 1045. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

Na figura 5, observa-se o comportamento da estrutura constituída de aço AISI 1045. Percebe-se que mesmo frente às tensões submetidas o limite de escoamento do

material não é ultrapassado.

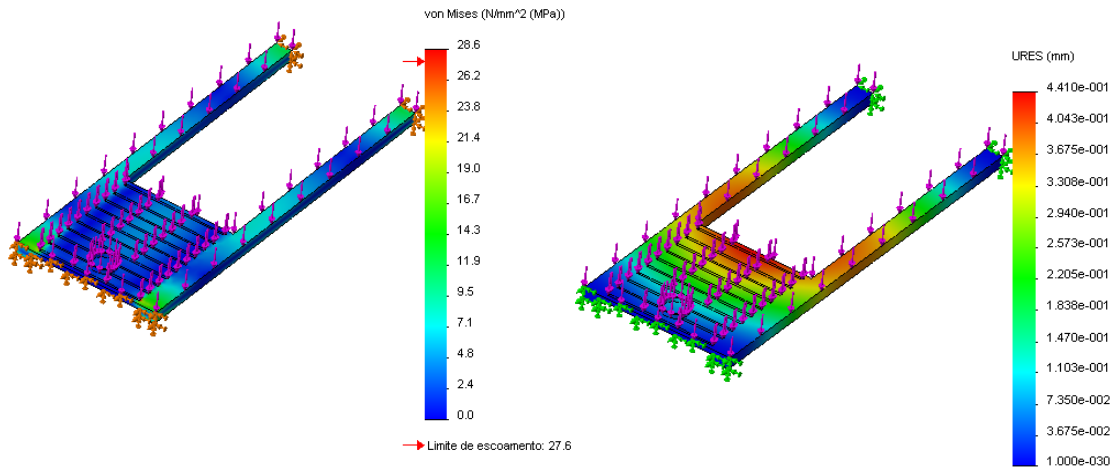


Figura 6 - Distribuição de tensões no chassi. Material Liga de Alumínio 1060. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

Na figura 6, observa-se o comportamento da estrutura constituído de Liga de Alumínio 1060. Percebe-se que frente as tensões submetidas o limite de escoamento do material é ultrapassado em alguns pontos da estrutura.

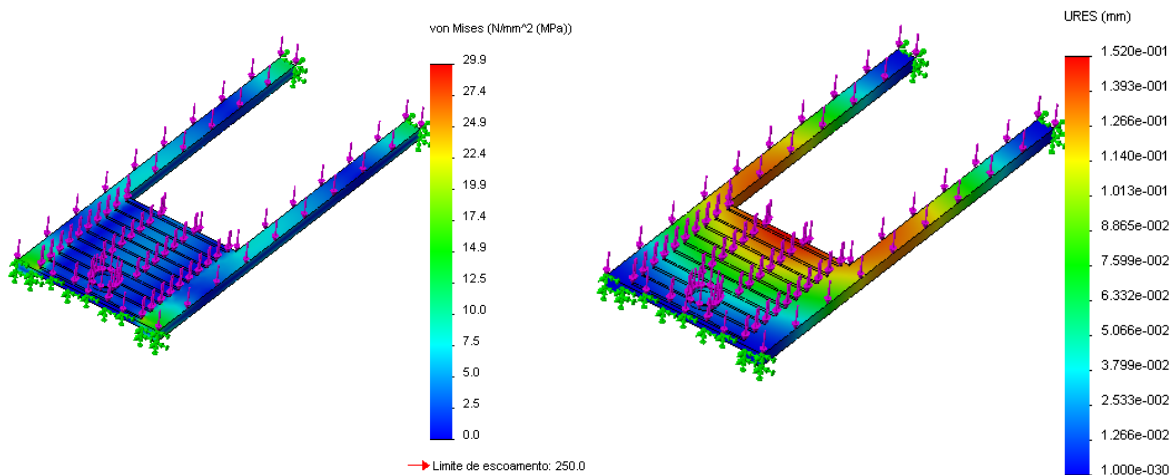


Figura 7 - Distribuição de tensões no chassi. Material Aço ASTM A36. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

Na figura 7, observa-se o comportamento da estrutura constituído de Aço ASTM A36. Percebe-se que frente às tensões submetidas o limite de escoamento do material não é ultrapassado.

#### 4.1.2 Teste de Impacto – Crash Test

A segurança das máquinas tanto veiculares, quando de cunho agrícola tem sua importância reconhecida pelos usuários em todo o mundo. Já há algumas décadas, esta característica divide, juntamente com o design, conforto, custo-benefício, as páginas das mais renomadas publicações automotivas e agrícolas (Cardoso e Oliveira, 2010).

Segundo o mesmo autor, durante uma colisão veicular, toda a energia cinética tem que ser dissipada de alguma forma até que os corpos (veículo e ocupante) cheguem à condição de repouso. No caso dos veículos, a energia será dissipada através da deformação de sua estrutura e de seu deslocamento. No caso dos ocupantes, nessa energia será dissipada através de seu amortecimento pelos componentes no interior do habitáculo.

Os critérios para se determinar quais as velocidades serão empregadas, as direções do impacto e as barreiras contra as quais os veículos serão chocados dependem do objetivo do ensaio. O ensaio realizado tem como objetivo prever como a transplantadora projetada irá comportar-se caso sofra um impacto, levando em conta a utilização de quatro tipos de materiais diferentes, ou seja, quatro cenários distintos.

A força aplicada foi de 3000N.

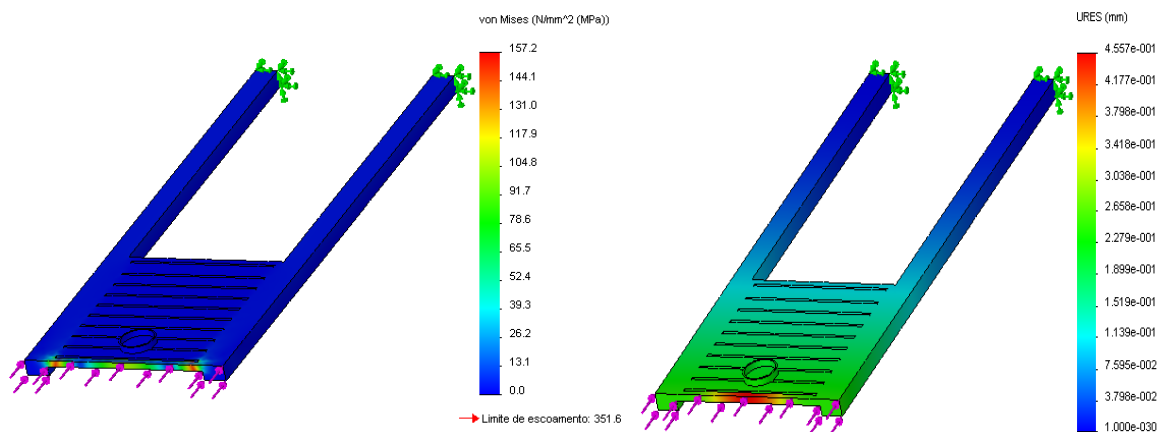


Figura 8 - Distribuição de tensões no chassi e deslocamento. Material Aço AISI 1020. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

A partir da distribuição de tensões segundo o critério de Von Mises, pode-se perceber, claramente, qual a localização da região do chassi que apresenta os valores máximos de tensões e também o deslocamento que esta tensão ocasiona na estrutura. Na figura 8, é perceptível as áreas críticas ocasionadas pelas forças empregadas, mesmo assim, o limite de escoamento do AISI 1020 não é ultrapassado.

Na figura 9, observa-se o comportamento da estrutura constituído de aço AISI 1045. Percebe-se que mesmo frente às tensões submetidas o limite de escoamento do material não é ultrapassado.



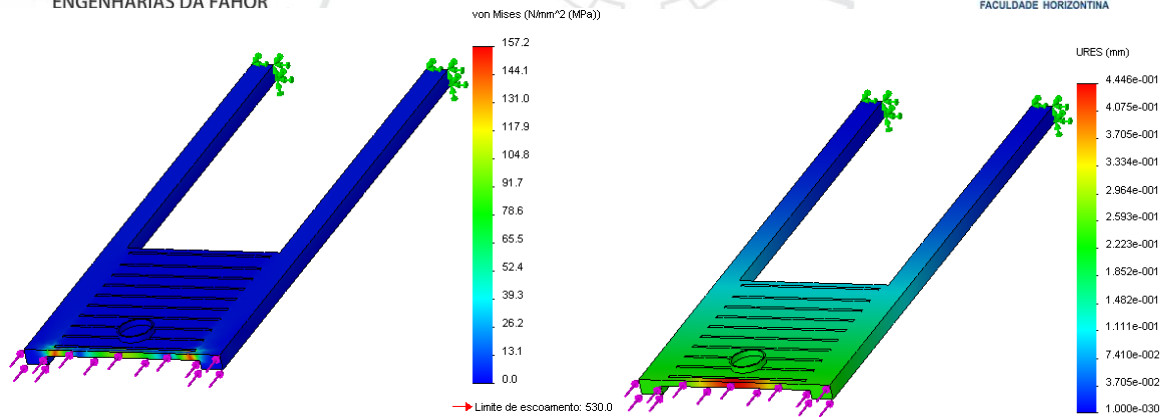


Figura 9 - Distribuição de tensões no chassi e deslocamento. Material Aço AISI 1045. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

Na figura 10, observa-se o comportamento da estrutura constituída de alumínio liga 1060. Percebe-se que frente às tensões submetidas o limite de escoamento do material é ultrapassado, o limite do material é 27,6 MPa e em muitos pontos os valores ultrapassam 156,6 MPa.

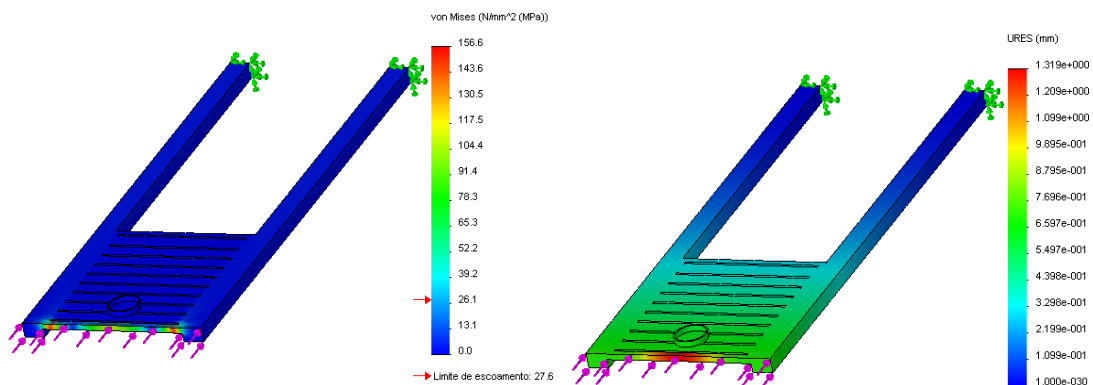


Figura 10 - Distribuição de tensões no chassi e deslocamento. Material Liga de Alumínio 1060. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

Na figura 11, observa-se o comportamento da estrutura constituído de aço ASTM A36. Percebe-se que mesmo frente às tensões submetidas o limite de escoamento do material não é ultrapassado.

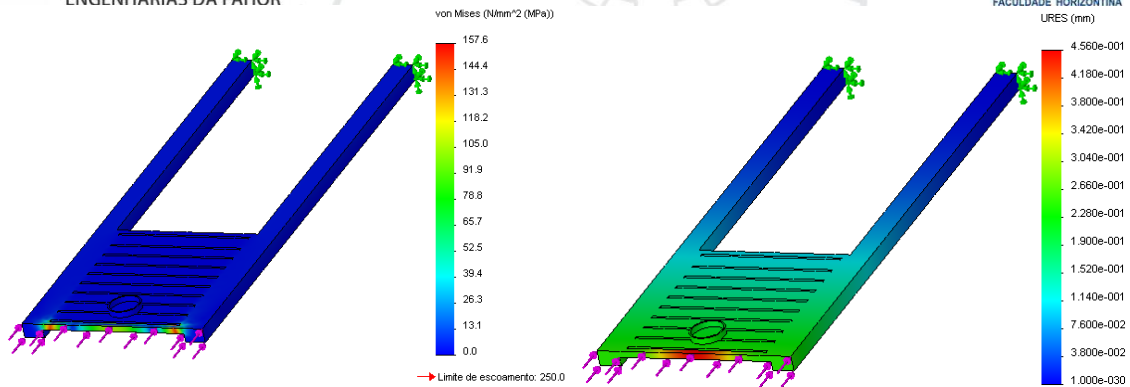


Figura 11 - Distribuição de tensões no chassi e deslocamento. Material ASTM A36. Fonte: Grupo de Projeto, 2011.

A partir da observação dos resultados fornecidos pelas análises e condensados nas Tabelas 1 e 2, percebe-se claramente que as tensões máximas obtidas, segundo os quatro cenários, são da mesma ordem de grandeza. A tensão máxima no chassi na análise de carga distribuída é da ordem de 29 Mpa e no teste de impacto é de 157 Mpa. Portanto, pode-se concluir que, em termos quantitativos os resultados obtidos em todos os quatro cenários em cada análise realizada são bastante aproximados, diferença máxima da ordem de 20%. Em termos qualitativos, pode-se afirmar que a deformação do sistema estrutural, em todas as análises, conduz basicamente ao mesmo resultado, o qual por estes motivos pode ser tido como confiável, segundo Silva 2011.

Tabela 1  
Comparação de Valores - Análise de Carga Distribuída

Material	Limite de Escoamento (Mpa)	Valor Máximo de Tensão (Mpa)	Deslocamento Máximo (mm)
AISI 1020	351,6	29,3	0,1521
AISI 1045	530,0	29,3	0,1484
ASTM A36	250,0	29,9	0,1520
Liga de Alumínio 1060	27,6	28,6	0,4410

Fonte: Grupo de Projeto 2011.

Tabela 2  
Comparação de Valores – Teste de Impacto

<b>Material</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Valor Máximo de Tensão (MPa)</b>	<b>Deslocamento Máximo (mm)</b>
AISI 1020	351,6	157,2	0,4557
AISI 1045	530,0	157,2	0,4446
ASTM A36	250,0	157,6	0,4460
Liga de Alumínio 1060	27,6	156,6	0,1319

Fonte: Grupo de Projeto 2011.

Conforme Buffoni (2011) os elementos estruturais e os componentes de máquinas são projetados de modo que o material que os compõem, sendo material dúctil, não venha a escoar pela ação dos carregamentos esperados. Dessa forma quando o engenheiro precisa elaborar um projeto com um determinado material, o mesmo deve estabelecer um limite superior para o estado de tensão que defina a falha do material. Se o material for dúctil, geralmente a falha será especificada pelo início do escoamento, sendo assim o limite de escoamento é a tensão máxima que um material pode suportar, antes que se inicie o escoamento plástico. Avaliando os resultados das análises conclui-se que tanto em situação de carga distribuída, como em teste de impacto (Crash Test) o único material que não poderá ser utilizado como matéria-prima do chassi em questão, é a liga de alumínio 1060, isto porque o seu limite de escoamento em vários pontos da estrutura foi ultrapassado, o que ocasionaria o escoamento plástico e possíveis falhas na estrutura. Os materiais AISI 1020, AISI 1045 e ASTM A36 podem ser utilizados, a definição de qual deles no entanto, poderia ser complementada através de um posterior estudo de custos.

## 5. Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho mostra claramente que a análise pelo método dos elementos finitos, respaldado pelo uso do software comercial SolidWorks Simulation, é totalmente válida para a simulação de impacto e de cargas distribuídas, pois pode-se comparar cenários de aplicação de material em diferentes situações, otimizando o processo e evitando os custos associados à experimentação.

Também através dos estudos dos resultados pode-se visualizar dentre os materiais analisados, o único que não poderia ser aplicável ao caso da transplantadeira de mudas era a liga de alumínio 1060 pois não apresentou resultados satisfatórios. Por se tratar de um projeto que busca a eficiência aliada ao baixo custo, concluiu-se que dentre os materiais AISI 1020, AISI 1045 e ASTM A36, pode-se optar por aquele que apresentar o menor custo de fabricação.

## 6. Referências

BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros. Estática, Cinemática e Dinâmica.** Volumes I e II. 5ª Edição Revisada, Editora Makron Books, São Paulo, 1994. P. 96-118.

BELTRÃO, V. J. A. **Desenvolvimento de Conceito e Análise Estrutural de um Kart que Acompanha o Crescimento da Criança.** Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009.

BUFFONI, S. **Crêterios de Falha.** Universidade Fluminense, 2011. Disponível em: <<http://www.professores.uff.br/salete/res1/aula141.pdf>> Acessado em: 01 out. 2011.

CARDOSO, E.; OLIVEIRA, B.F. **Estudo do comportamento do Chassi de Veículo em Espuma Metálica Submetido a teste de Impacto.** Porto Alegre, 2010.

COOK, R. D.; MALKUS, D.; PLESHA, M. E. **Introduction.** In: **Concepts and applications of finite element analysis.** 3. ed. John Willey & Sons, 1989. cap. 1, p. 1-30.

FOGAL, M. L. F. **Método dos Elementos Finitos Aplicado em Análise Estrutural Estático.** Relatório de Estágio. UNESP Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2002.

PINHEIRO, M.P.G.F. **Análise comparativa da influencia da torção de um chassi de FSAE no comportamento dinâmico do veículo.** Dissertação de mestrado - Centro Universitario da Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros - FEI, São Bernardo do Campo, 2010.

SILVA, J. G. S. et al. **Análise Estrutural de Chassis de Veículos Pesados com Base no Emprego do Programa ANSYS.** Universidade do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

TIMOSHENKO, S.P. e GERE, J.E. **Mecânica dos Sólidos.** Volumes I e II. Editora Livros Técnicos Científicos, Rio de Janeiro, 1984.

VIRTUALCAE Disponível em: <<http://www.virtualcae.com.br/solidworks-simulation-professional.html>> Acessado em: 01out 2011.